

アルミニウム合金A3004-H34の高ひずみ速度域における変形応力のひずみ速度依存性

著者	山田 椋太
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	61
ページ	1-8
発行年	2020-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00022760

アルミニウム合金 A3004-H34 の高ひずみ速度域 における変形応力のひずみ速度依存性

STRAIN RATE DEPENDENCY OF DYNAMIC FLOW STRESS OF A3004-H34 AT HIGH STRAIN RATES

山田 稜太

Ryota YAMADA

指導教員 崎野清憲

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

The strain rate dependence of the flow stress in FCC metals is known to become large as the strain rate rises. The flow stress of FCC metal increase gradually from low strain rate to high strain rate. And the flow stress increase rapidly when the strain rate exceed about 5×10^3 /sec. However, its deformation mechanism has not yet been elucidated. In order to evaluate the strain rate dependence of the flow stress of A3004-H34, constant strain rate tests of A3004-H34 were conducted at the strain rates of about 4×10^3 to 1.9×10^4 /sec. And strain rate reduction tests of A3004-H34 were also conducted at the strain rates of about 1.3×10^4 to 1.75×10^4 /sec. Two experimental results showed that the instantaneous strain rate plays dominant role in the flow stress at very high strain rates. A simplified model for dislocation kinetics was used to consider based on the measured values of constant strain rate tests (4000 to 19000 /sec) of A3004-H34 and high-purity aluminum. Flow stress calculated using the expression derived from the model tend to be similar to flow stress measured directly in the high strain rate range. Therefore it is considered that the rapid increase in the flow stress at high strain rate was caused by a shift from the control of the thermal activation process to the control of the phonon viscosity drag.

Key Words : Strain Rate Dependence, Constant Strain Rate Test, Strain Rate Reduction Test, Instantaneous Strain Rate, Thermal Activation Process, Phonon Viscosity Drag

1. 緒論

面心立方金属の変形応力はひずみ速度の増加に伴い、大きくなることが知られている。^{1) 2)} 変形応力は低ひずみ速度側から高ひずみ速度側にかけて緩やかな上昇を示すが、高ひずみ速度 5×10^3 /sec

付近から急上昇することが報告されている。しかし、その変形機構は未だ十分に解明されていない。この変形応力のひずみ速度依存性の急上昇は瞬間的なひずみ速度に依存する考え^{3) 4)} と、ひずみ速度履歴に依存する考え^{5) 6)} がある。これらを明ら

かにすることは、ひずみ速度 5×10^3 /sec 付近の変形応力のひずみ速度依存性の変形機構を把握するために重要であり、広いひずみ速度領域における構成式を導くためには欠かせないものである。そこで、瞬間的なひずみ速度とひずみ速度履歴のどちらに依存しているかを調査するために試験片の変形途中でひずみ速度を急変させる速度急変実験を行い、それに対応する変形応力の変化を測定する必要がある。本研究はまず初めに A3004-H34 を対象に、ひずみ速度 4.0×10^3 /sec から 1.9×10^4 /sec の範囲で定速度実験を行った。その後、 1.3×10^4 /sec から 1.75×10^4 /sec 迄の範囲で変形中にひずみ速度を急変させる速度急変実験を行い、定速度実験および速度急変実験で得られた実測値から瞬間的なひずみ速度またはひずみ速度履歴のどちらに依存しているかを調査した。そして、A3004-H34 および 5nAl に対し、ひずみ速度 10^{-1} /sec および 4×10^3 /sec から 1.9×10^4 /sec の広いひずみ速度領域において異なる試験温度(273K, 373K, 473K)で定ひずみ速度実験を行い、得られた実験結果と転位の運動機構によって導かれた変形応力のひずみ速度依存性とを比較し、考察した。

2. 試験片および実験方法

実験に用いた試験片は A3004-H34 と 5nAl で、直径、長さ共に 1.5 mm の円柱形である。試験片の化学成分を Table 1, Table 2 に示す。

Table 1 Chemical composition of A3004 (mass %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	その他		Al
						個々	合計	
≤ 0.30	≤ 0.70	≤ 0.25	1.0 ~ 1.5	0.8 ~ 1.3	≤ 0.25	≤ 0.05	≤ 0.15	残部

Table 2 Chemical composition of 5nAl (mass %)

Si	Fe	Cu	Zn	その他	Al
<0.0010	<0.0010	<0.0015	<0.001	<0.001	≥ 99.999

速度急変実験および定速度圧縮試験装置を Fig.1, Fig.2 に示す。なお、ひずみ速度 10^{-1} /sec における

低ひずみ速度圧縮試験はインストロン型試験機を用いた。

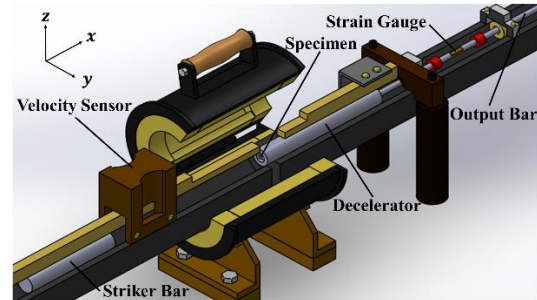


Fig.1 Equipment for constant strain rate and strain reduction tests.

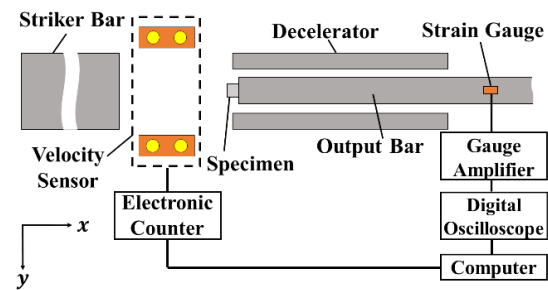


Fig.2 Apparatus devised for high strain rate tests.

本研究で用いた試験装置は打撃棒、入力棒、出力棒から形成されるスプリットホプキンソン棒装置から入力棒を取り除いた構造であり、試験片に打撃棒を直接衝突させて評価する DHPB(Direct-impact Hopkinson Pressure Bar)法を採用している。速度急変実験を行うために打撃棒、出力棒および出力棒外側に接触することのないよう同心円状に設置された減速用中空丸棒で形成されている。エアコンプレッサーの圧縮空気を利用して打撃棒を高速で発射させ、グリースの粘着力を利用して出力棒端面に取り付けられた試験片に直接衝突させる。試験片の変形応力は出力棒に貼られた 2 枚の半導体ひずみゲージによって検出され、動ひずみ計を介してデジタルオシロスコープに出力される。なお、減速用中空丸棒は試験片のひずみ量が所定の値に達したところで試験片のひずみ速度が減少するよ

うに設置した。また、定ひずみ速度実験を行う際は減速用中空丸棒を使用していない。出力棒 (W 製) は直径 4 mm, 長さ 500 mm である。打撃棒 (Ti 合金製), 減速棒 (Ni 合金製) は共に外径 13 mm である。減速用中空丸棒の内径は出力棒との接触を考慮に入れ 7 mm, 長さは 100 mm である。実験で測定しているものは出力棒に貼り付けた半導体ひずみゲージで検出した透過ひずみ ε_T のみであるが透過ひずみ ε_T と反射ひずみ ε_R の和は入射ひずみ ε_I に等しいという関係が成り立っていると仮定して研究を行った。この関係を式(1)に示す。

$$\varepsilon_I = \varepsilon_R + \varepsilon_T \quad (1)$$

入射ひずみ ε_I は

$$\varepsilon_I = \frac{v_0}{2C_0} \quad (2)$$

v_0 : 打撃棒初速度

C_0 : 弾性伝播速度 (出力棒)

であり, v_0 はタイムカウンターで測定した。また, C_0 は 4233 m/s である。透過ひずみ ε_T はオシロスコープで出力された電圧高さ V と出力棒に貼り付けた半導体ひずみゲージの較正值を算出し, これらを用いて次式で与えられる。

$$\varepsilon_T = V \times \text{calibration} \quad (3)$$

V : 電圧高さ

公称応力 σ_n は

$$\sigma_n = E \left(\frac{A}{A_0} \right) \varepsilon_T \quad (4)$$

E : 縦弾性係数 (出力棒)

A : 断面積 (出力棒)

A_0 : 断面積 (試験片)

で表される。打撃棒が減速用中空丸棒に衝突する前および衝突後の試験片のひずみ速度は次式で与えられる。

a) 衝突前 (減速前)

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{\ell_0} \left(v_0 - \frac{A_0 \sigma_n}{A_1 c_1 \rho_1} - \frac{A_0 \sigma_n}{A_3 c_3 \rho_3} \right) \quad (5)$$

b) 衝突後 (減速後)

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{\ell_0} \left(\frac{v_0 - (A_0 \sigma_n / A_1 c_1 \rho_1)}{1 + (A_2 c_2 \rho_2 / A_1 c_1 \rho_1)} - \frac{A_0 \sigma_n}{A_3 c_3 \rho_3} \right) \quad (6)$$

ここで, ρ , c , A は棒の密度, 弾性伝播速度および断面積を表しており, 添字 1, 2, 3 は打撃棒, 減速用中空丸棒および出力棒を表している。 A_0 , ℓ_0 , σ_n は試験片の変形前の断面積と長さおよび変形中の公称応力である。

試験片の公称ひずみ ε_n と真応力 σ_t は次式のように求められる。

$$\varepsilon_n = \int_0^t \dot{\varepsilon} \, dt \quad (7)$$

$$\sigma_t = \sigma_n (1 - \varepsilon_n) \quad (8)$$

なお, 後に示す真応力-ひずみ速度線図は, 公称ひずみ速度を一定とした真応力-公称ひずみ速度線図から求めている。

3. 実験結果

A3004-H34 の高ひずみ速度域における変形応力のひずみ速度依存性を調べる為に, ひずみ速度 4.0×10^3 /sec から 1.9×10^4 /sec の範囲で定速度実験を行った。Fig.3 にその結果を示す。変形応力のひずみ速度依存性はひずみ速度の増加と共に次第に大きくなっていることが分かる。定速度実験から得られたあるひずみ速度における変形応力と各定速度試験より算出した測定値の応力-ひずみ速度線図に対応するあるひずみ速度の変形応力との差を $\Delta\sigma_d$ とする。Fig.3 にはひずみ速度 1.72×10^4 /sec と 6.34×10^3 /sec の応力差を示している。

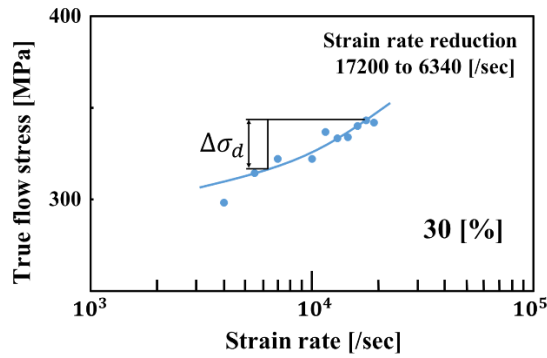
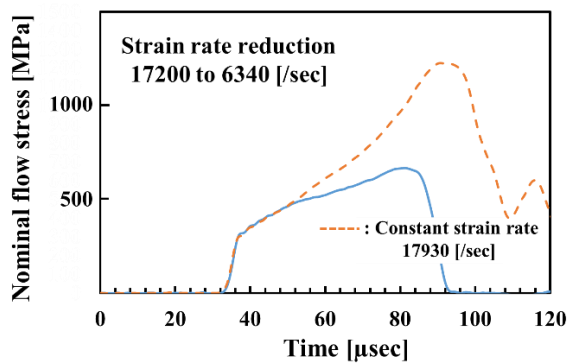
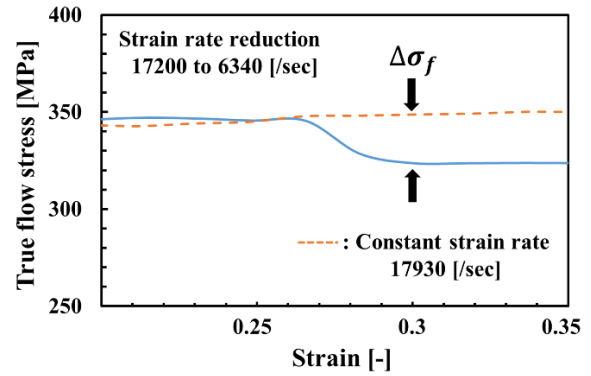


Fig.3 Strain rate dependence of the flow stress.

次に、ひずみ速度 1.3×10^4 /sec から 1.75×10^4 /sec の範囲で速度急変実験を行った。Fig.4(a)は試験片のひずみ 27% 付近でひずみ速度を 1.72×10^4 /sec から 6.34×10^3 /sec に急速に降下させた際の公称応力-時間線図である。なお、打撃棒が減速棒に衝突した際のひずみ速度降下率は運動量保存則より 63.1% である。(b)は(a)の速度が急変した部分を拡大した真応力-ひずみ線図である。図中にはひずみ速度 1.79×10^4 /sec における定速度実験の結果も破線で同時に示している。速度急変前の変形応力がほぼ一致していることから、速度急変後の変形応力の差をひずみ速度の変化による変形応力の降下量であるといえる。



(a) Nominal flow stress vs time curves.



(b) True flow stress vs strain curves.

Fig.4 Response of flow stress to sudden reduction in strain rate from 1.72×10^4 to 6.34×10^3 /sec and stress at constant strain rate of 1.79×10^4 /sec.

Fig.5 はひずみ速度 1.3×10^4 /sec, 1.45×10^4 /sec, 1.6×10^4 /sec, 1.75×10^4 /sec 付近でそれぞれ行った速度急変実験の結果をまとめて示したものである。縦軸は速度急変による変形応力の降下量であり、横軸はひずみ速度を対数座標で表している。Fig.5 より、ひずみ速度の増加と共に変形応力は次第に大きくなることが分かる。どの試験においても Fig.3(b)に示したような速度急変前の変形応力の一致が確認できたため、速度急変後との応力差はひずみ速度の変化によって生じた変形応力の降下量とみなした。

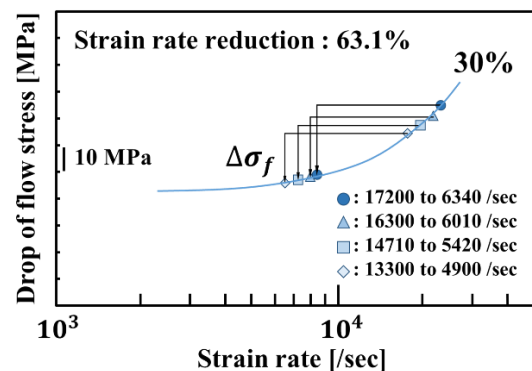


Fig.5 Strain rate dependence of dynamic flow stress drop determined by a series of the strain rate reduction tests.

速度急変実験による変形応力の降下は瞬間的なひずみ速度に依存しているのか、それともひずみ速度履歴によるものかを調査するために、Fig.4(b)およびFig.5に示した速度急変による変形応力の降下量を $\Delta\sigma_f$ とする。そして、Fig.3で示した定速度実験の結果から求めたひずみ速度降下前および降下後に対応する変形応力差 $\Delta\sigma_d$ との比で表される $\Delta\sigma_f/\Delta\sigma_d$ を速度急変による変形応力の降下率とする。Fig.4(b)で示した変形応力の降下量 $\Delta\sigma_f$ はおよそ25.2 MPaであり、Fig.3の定速度実験から予想される変形応力の降下量 $\Delta\sigma_d$ は25.5 MPaであった。従って、速度急変による変形応力の降下率 $\Delta\sigma_f/\Delta\sigma_d$ の値はおよそ98.9%となった。よって、ほぼ100%付近であるということは瞬間的なひずみ速度に強く依存しているといえる。Fig.6は各速度急変実験の結果をまとめたものである。縦軸を速度急変による降下率 $\Delta\sigma_f/\Delta\sigma_d$ 、横軸を速度急変前のひずみ速度で示している。各試験の平均を鎖線で示す。平均値は1.01となり、各試験において瞬間的なひずみ速度に依存していることがいえる。よって、変形応力のひずみ速度依存性は瞬間的なひずみ速度に強く依存していると考えることができる。

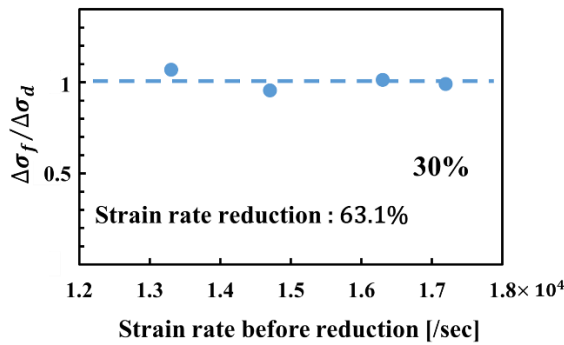


Fig.6 Descent rate of flow stress determined by a series of constant strain rate tests and strain rate reduction tests.

4. 考察

速度急変実験の結果より、高ひずみ速度域における変形応力のひずみ速度依存性は瞬間的なひずみ速度に強く依存していることが分かった。そこで、この変形応力がひずみ速度 $5 \times 10^3/\text{sec}$ 付近から急上昇する現象を、変形応力の瞬間ひずみ速度依存型の転位モデル^{7),8)}を用いて解析した。すべり面上の運動転位の簡単な動力学モデルをFig.6(a)に示す。また、Fig.7(a)に示した運動転位の一部分を(b)に示す。 L は林転位の平均間隔である。

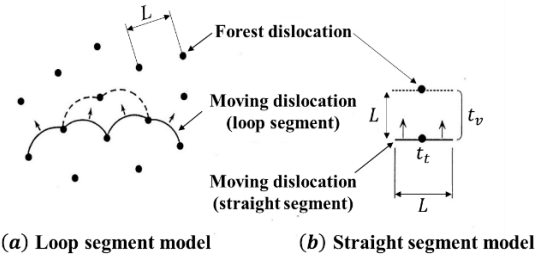


Fig.7 Kinetic model of dislocation segment motion

転位の移動速度 v_d は、林転位との切り合いの待ち時間を t_t 、林転位間を通過するのに要する時間を t_v とすると

$$v_d = L/(t_t + t_v) \quad (5)$$

となり、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ はオロワンの式から

$$\dot{\gamma} = \rho_d b v_d \quad (6)$$

と表される。ここに

ρ_d : 運動転位密度 (単位体積中の運動転位の総長さ)

b : バーガースベクトル

よって、式(6)は次式のようなになる。

$$\dot{\gamma} = \rho_d b L / (t_t + t_v) \quad (7)$$

林転位との切り合いは熱活性化の助けを借りて行われているため、待ち時間 t_t は次式のように与えられる。

$$t_t = v^{-1} \exp[(E_c - \tau V)/kT] \quad (8)$$

ここに、

v : デバイの振動数

E_c : 切り合いの真の活性化エネルギー

τ :せん断応力 (せん断応力の熱的成分)

k :ボルツマン定数

T :絶対温度

V :活性化体積(= Lb^2)

である.

次に, 転位の林転位間の運動はフォノンや伝導電子を散乱する際の粘性抵抗に律速されるので, その通過時間 t_v は次式のように与えられる.

$$t_v = BL/\tau b \quad (9)$$

B : 摩擦係数

よって, 式(5)は式(8),(9)より

$$\dot{\gamma} = \rho_d b L / \{ v^{-1} \exp[(E_c - \tau L b^2)/kT] + BL/\tau b \} \quad (10)$$

と表すことができる. この式は低ひずみ速度域から高ひずみ速度域にかけての運動転位の律速機構の遷移を評価できる応力とひずみ速度の関係式である. 低速の時, t_v は t_t と比べて非常に短いので, 式(10)は近似的に

$$\dot{\gamma} \approx \rho_d b L / v^{-1} \exp[(E_c - \tau V)/kT] \quad (11)$$

となる. 反対に, 高速の時の t_t は t_v と比べて極めて短いので, 式(10)は近似的に

$$\dot{\gamma} \approx \rho_d b^2 \tau / B \quad (12)$$

となる. なお, 実測値の変形応力の比較は, 応力の非熱的成分の影響を考慮に入れる必要がある.

外部から加わる応力を τ_0 , 応力の非熱的成分を τ_a とすると, 転位を動かそうとする応力 τ は $\tau_0 - \tau_a$ となる. そこで, Fig.3 で見られる変形応力の上昇を式(10)より評価する. 実験結果は試験片の変形応力 σ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係であるが, 式(10)は分解せん断応力 τ とせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関係で導かれるためテーラー因子を 3.06 として換算した. 式(10)の未知数は平均林転位間隔 L , 運動転位密度 ρ_d および応力の非熱的成分 τ_a である. 活性化体積 V は Fig.8 に示すような実測値より示した応力-ひずみ速度線図の直線部分の傾きから求めた.

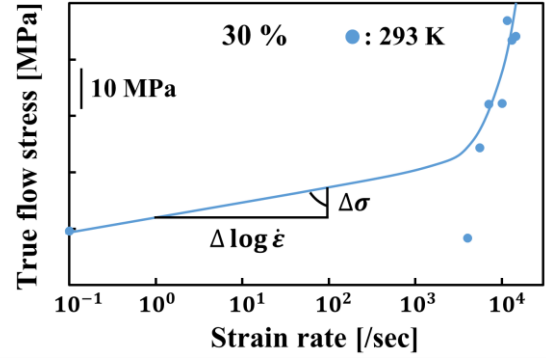


Fig.8 Relationship between stress and strain rate.

平均林転位間隔 L は算出した活性化体積 $V = Lb^2$ の関係より求めた. ρ_d は式(10)が示す変形応力の上昇が実測値の変形応力の上昇と重なるように ρ_d の値を決定した.⁹⁾ τ_a は応力の非熱的成分の影響を含まない計算値とその影響を含む実測値との比較し, 一致する値を τ_a とした. 以上より, 算出した A3004-H34 および 5nAl の未知数を Table 3, Table 4 に示す.

Table 3 Values of L , ρ_d , V and σ_a employed for A3004-H34

	A3004-H34 ($\epsilon = 0.3$)			unit
	293 K	373 K	473 K	
L	1.0×10^{-7}	7.4×10^{-8}	5.5×10^{-8}	m
ρ_d	1.8×10^{10}	2.1×10^{10}	2.2×10^{10}	m^{-2}
V	8.3×10^{-27}	6.0×10^{-27}	4.5×10^{-27}	m^3
τ_a	89.9	77.8	52.3	MPa

Table 4 Values of L , ρ_d , V and σ_a employed for 5nAl

	5nAl ($\epsilon = 0.3$)			unit
	293 K	373 K	473 K	
L	5.0×10^{-8}	7.4×10^{-8}	7.0×10^{-8}	m
ρ_d	1.0×10^{10}	2.0×10^{10}	3.0×10^{10}	m^{-2}
V	4.1×10^{-27}	6.0×10^{-27}	5.8×10^{-27}	m^3
τ_a	11.4	10.8	9.2	MPa

活性化エネルギー E_c は $Gb^3/5$ を用いた.¹⁰⁾ 各試験温度における摩擦係数は $B = 4.88 \times 10^{-6}$ (293K), 6.42×10^{-6} (373K), 8.24×10^{-6} (473K) Pa \cdot sである.¹¹⁾ 計算値より求めた応力-ひずみ速度線図を Fig.8, Fig.9 に破線でそれぞれ示す. 図中に示される記号 (●, ▲, ■) は実測値であり, 実線で示した.

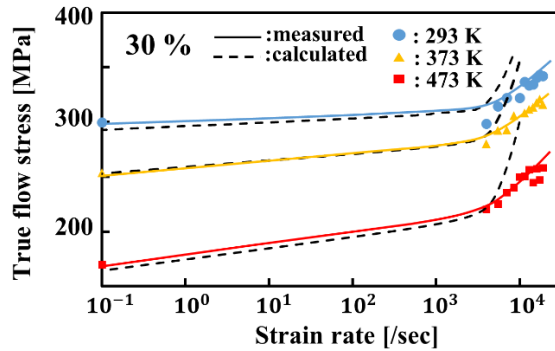


Fig.9 Comparison of measured and calculated values of A3004-H34 in each temperature test in high strain rate region.

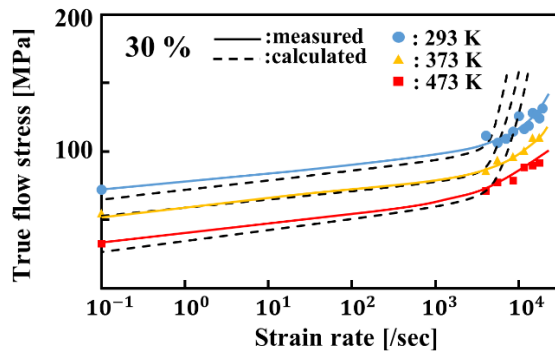


Fig.10 Comparison of measured and calculated values of 5nAl in each temperature test in high strain rate region.

Fig.8, Fig.9 より、温度の上昇に伴って変形応力は低くなっている。実測値と計算値の傾向の一致から、ひずみ速度 5×10^3 /sec 付近からの変形応力の上昇は転位の運動の律速機構が林転位との切り合いによる熱活性化過程支配から粘性抵抗支配へと遷移したと考えることができる。しかし、低ひずみ速度域における変形応力の実測値は計算値とほぼ一致しているのに対して、高ひずみ速度域での立ち上がりは実測値の方は上昇が緩やかであった。これは式(10)によって算出された計算値の林転位間隔がすべて等しいものとして計算しているためと考えられる。したがって、Table 5 および Table 6 に実測値の各ひずみ量における平均林転位間隔 L をまとめたものを示す。

Table 5 Average forest dislocation interval of A3004

at each strain

	A3004-H34			unit
	293 K	373 K	473 K	
10 %	7.0×10^{-8}	6.3×10^{-8}	4.5×10^{-8}	m
20 %	9.2×10^{-8}	7.4×10^{-8}	4.7×10^{-8}	
30 %	1.0×10^{-7}	7.8×10^{-8}	5.5×10^{-8}	

Table 6 Average forest dislocation interval of A3004

at each strain

	5nAl			unit
	293 K	373 K	473 K	
10 %	5.0×10^{-8}	8.9×10^{-8}	7.2×10^{-8}	m
20 %	5.0×10^{-8}	7.4×10^{-8}	7.5×10^{-8}	
30 %	5.0×10^{-8}	7.8×10^{-8}	7.0×10^{-8}	

Table 5, Table 6 より、同じ試験下であるにも関わらず実測値から算出した平均林転位間隔はひずみ量が変わると異なる値を示した。このことから林転位間距離は等間隔ではないと考えられる。

5. まとめ

A3004H-34 に対し、ひずみ速度 4.0×10^3 /sec から 1.9×10^4 /sec までの定ひずみ速度実験を行い、 1.3×10^4 /sec から 1.75×10^4 /sec の範囲で行った速度急変実験の結果とそれに対応する定速度実験との結果を比較し、A3004H-34 の変形応力のひずみ速度依存性を調査した。その後、A3004H-34 および 5nAl を対象にひずみ速度 10^{-1} /sec および 4.0×10^3 /sec から 1.9×10^4 /sec の範囲における定速度実験で得られた実測値と変形応力急上昇域における計算値との比較を行った。本研究の結果より、以下のことを示す。

- (1) 定速度実験および速度急変実験の結果より、A3004H-34 の変形応力は内部組織変化を伴うひずみ速度履歴よりも瞬間的なひずみ速度に強く依存している。
- (2) 実測値と測定値の比較より、高ひずみ速度域における変形応力の急上昇は転位の運動の律速機構が低速側の熱活性化過程による林転位との切り

合いから高速側の粘性抵抗支配へ遷移したためである.

(3) 林転位間距離は一定間隔ではない.

参考文献

- 1) W. Tong and R.J. Clifton, “Pressure shear impact investigation of strain rate history effects in oxygen-free high-conductivity copper”, *Journal Mechanical Physics of Solids*, Vol.40, No.6, pp.1251-1294 (1992).
- 2) A.R. Dowling, J. Harding and J. D. Campbell, “The Dynamic Punching of Metals”, *Journal of Institute of Metals*, Vol.98, pp.215-224 (1970).
- 3) Ferguson, W.G., ほか 2 名, *J. Appl. Phys.*, 38(1967), 1863.
- 4) Shioiri, J., ほか 2 名, *J. de Physique*, (1991), C3-177.
- 5) Follansbee, P.S. and Kocks, U.F., *Acta Met.*, 36(1988), 81.
- 6) Tong, W. and Clifton, R.J., *J. Mech. Phys. Solids*, 40-6 (1992), 1251.
- 7) A. Kumar and R.G. Kumble, “Viscous drag on dislocation at high strain rates in copper”, *Journal Applied of Physics*, Vol.40, pp.3475-3480 (1969).
- 8) J. Shioiri and K. Satoh, “An ultrasonic study of the behavior of dislocations at very high rates of strain”, *Proceedings of Mechanical Properties at High Rates of Strain*, J. Harding (ed.), *Institute of Physics Conf. Ser.*, No.70, pp.89-96 (1984).
- 9) K. Sakino, “Strain Rate of Dynamic Flow stress of 6061-T6 Aluminum Alloy at Strain Rates Ranging from 1×10^3 to $4 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ ”, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.55, No.11, pp.1021-1026, Nov.2006.
- 10) M.F. Ashby and H.J. Frost, “Constitutive Equations in Plasticity”, A.S. Argon (ed.), p.117

(1975) MIT Press.

- 11) A. Hikata, R.A. Johnson, and C. Elbaum, “Interaction of Dislocations with Electrons and with Phonons”, *Physical Review B*, Vol.2, No.12, pp.4856-4863 (1970).